

В.В. КРИВУЩЕНКО, А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

РАСЧЕТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ТОКОВ, ЗАДАННЫХ ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ

У роботі досліджена можливість формування імпульсу струму, заданого набором амплітудно-часових параметрів та інтегралом дії. Розглянуто вибір параметрів традиційної схеми розряду емнісного накопичувача енергії.

In work capability of the current impulse formation specified by a combination of amplitude-time parameters and action integral is investigated. The parameters selection of the traditional scheme of the energy capacitor storage discharge is considered.

Постановка проблемы. Интеграция Украины в мировую экономику ставит задачу проведения сертификации выпускаемой продукции в соответствии с международными нормативными документами и, в частности, проведения различных испытаний технических средств.

Одним из видов испытаний электротехнического оборудования является проверка его работоспособности в условиях грозовой деятельности и, в частности, при поражении разрядом молнии. Испытания такого рода проводятся с использованием высоковольтных импульсных испытательных устройств (ВИИУ), создаваемых на базе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), что требует постоянного усовершенствования ВИИУ, в том числе и их методов расчета.

Анализ публикаций. В настоящее время проведение испытаний объектов регулируется рядом международных и национальных документов [1 – 3]. Ток разряда молнии представляется в них в виде ряда импульсов, которые в зависимости от целей испытания и типа испытуемых объектов, должны формироваться в комплексе или раздельно.

Наибольшую опасность при поражении объектов молнией представляет первый импульс тока – так называемая А-составляющая тока молнии. Такой импульс характеризуется следующими контролируемыми параметрами: длительностью нарастания значений импульса от уровня 0,1 до уровня 0,9 от максимального значения – $T_{H(0,1;0,9)}$, длительностью спада значений до уровня 0,01 от максимального значения – $T_{C0,01}$, максимальным значением тока – i_{\max} , а также интегралом действия тока, за время $T_{C0,01}$. Аналогичным способом нормируется также D-составляющая импульса тока молнии. Конкретные значения параметров определяются как типом составляющей, так и целью проведения испытаний (проверка на устойчивость к прямому поражению молнией или вторичным проявлениям тока молнии).

Вопросы выбора параметров разрядной цепи ЕНЭ при задании импульса тока набором амплитудно-временных параметров достаточно полно рассмот-

рены в [4, 5]. Соотношения для расчета интеграла действия по известным параметрам разрядной цепи ЕНЭ приведены в [6]. Однако комплексно вопрос выбора параметров разрядной цепи при комбинированном задании импульса тока в настоящее время не рассмотрен.

Целью настоящей работы является исследование возможности формирования в традиционной схеме разряда емкостного накопителя энергии импульса тока, заданного набором амплитудно-временных параметров и интегралом действия.

Материалы и результаты исследований. Рассмотрим традиционную схему разряда ЕНЭ, показанную на рис.1

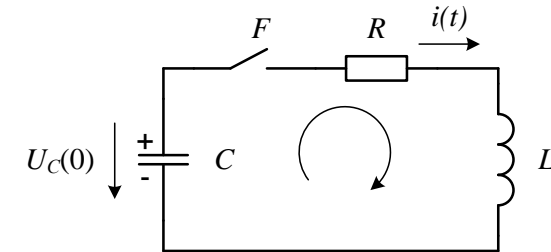


Рис. 1. Эквивалентная схема разряда ЕНЭ.

$U_C(0)$, C , L , R , – зарядное напряжение конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность разрядной цепи, активное сопротивление разрядной цепи

Как известно [6], интеграл действия импульса тока определяется из соотношения

$$J = \int_0^{t_1} i^2(t) dt, \quad (1)$$

где t_1 – время от начала импульса тока.

Можно показать, что при полном разряде конденсатора ($t_1 \rightarrow \infty$) в последовательной RLC – цепи, интеграл действия (полный интеграл действия) равен

$$J = \frac{CU_C^2(0)}{2R} = \frac{CU_C^2(0)}{\sqrt{\frac{L}{C}}} j, \quad (2)$$

где $j = \int_0^{\infty} I^2(\tau) d\tau = \frac{1}{2r}$ – безразмерный аналог интеграла действия;

$I(\tau) = \frac{i(t)}{U_C(0)} \sqrt{\frac{L}{C}}$ – безразмерный аналог тока;

$r = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$ – безразмерный аналог активного сопротивления разрядной цепи.

пи.

Пусть заданы следующие контролируемые параметры импульса тока: время, характеризующее нарастание значений импульса тока – t_H , время, характеризующее спад значений импульса тока – t_C , максимальное значение импульса тока – i_{\max} , а также активное сопротивление нагрузки – R_H и интеграл действия J_Z , вычисляемый за время разряда конденсатора.

Если известно активное сопротивление нагрузки R_H , то с использованием соотношений из [4, 5] выражение (2) приводится к виду:

$$2\tau_f r I_{\max}^2 = \frac{i_{\max}^2 t_f}{J_Z}, \quad (3)$$

где $\tau_f = \frac{t_f}{\sqrt{LC}}$ – безразмерный аналог времени нарастания;

i_{\max}, I_{\max} – соответственно максимальное значение тока и его безразмерный аналог.

Из материалов публикаций [4, 5] следует, что левая часть (3) является однозначной функцией отношения временных параметров импульса тока:

$$F\left(\frac{t_{\tilde{N}}}{t_f}\right) = 2\tau_f r I_{\max}^2. \quad (4)$$

Таким образом, если заданы J_Z, i_{\max}, t_f , то (3) может быть удовлетворено только при единственном значении $\frac{t_{\tilde{N}}}{t_f}$, которое в общем случае может не совпадать с требуемым значением. И, наоборот, при заданных $t_{\tilde{N}}$ и t_f , а значит и $F\left(\frac{t_{\tilde{N}}}{t_f}\right)$ в общем случае не выполняется отношение $\frac{i_{\max}^2 t_f}{J_Z}$.

Для варианта униполярного аperiodического импульса тока, в случае когда $t_H = T_{H(0,1;0,9)}$ и $t_C = T_{C0,01}$ график функции (4) имеет вид, показанный на рис. 2, и описывается выражением (5)

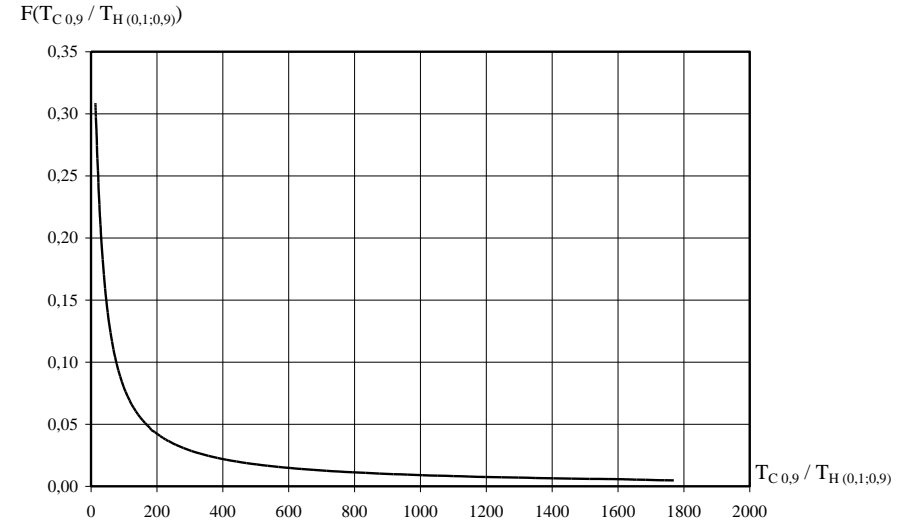


Рис. 2. Вид функции (4) для варианта аperiodического разряда ЕНЭ

$$F\left(\frac{T_{\tilde{N}0,01}}{T_{f(0,1;0,9)}}\right) = 3,6454 \left(\frac{T_{\tilde{N}0,01}}{T_{f(0,1;0,9)}}\right)^{-0,861}, \quad (5)$$

где $\frac{T_{\tilde{N}0,01}}{T_{f(0,1;0,9)}} \geq 13,4$.

Для варианта колебательного затухающего импульса тока график функции (4) приведен на рис. 3. В этом случае время спада $T_{H(0,1;0,9)}$ при расчетах определялось для первой полуволны тока.

Если интеграл действия вычисляется за некоторое время $t < \infty$, то:

$$J(t_1) = \int_0^{t_1} i^2(t) dt = k(t_1) \frac{CU_C^2(0)}{2R_f}, \quad (6)$$

где $k(t_1) < 1$ – коэффициент уменьшения интеграла действия.

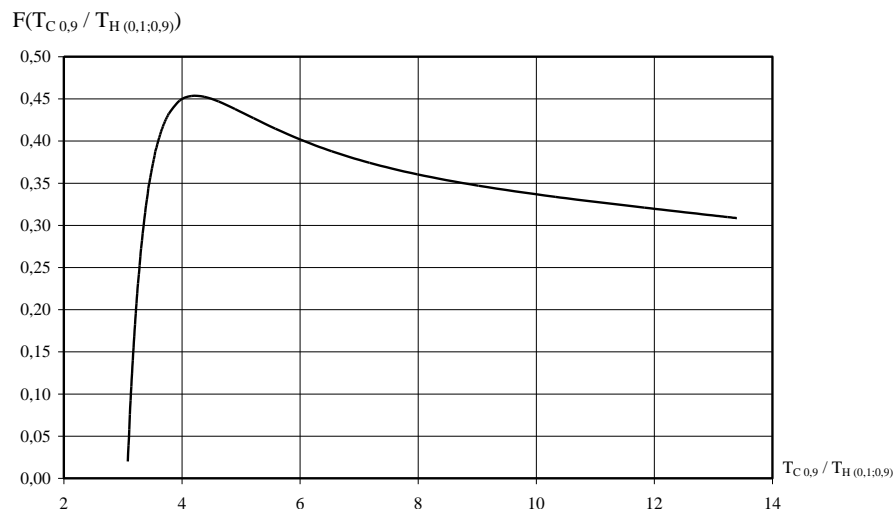


Рис. 3. Вид функции (4) для варианта колебательного разряда ЕНЭ

Произведем оценку значений $k(t_1)$. Расчеты показывают, что коэффициент $k(t_1)$ для аperiodического режима разряда ($r > 2$) при $t_1 = T_{C 0,01}$ может быть с большой точностью принят равным 1, для колебательного режима – может быть определен с использованием графика, приведенного на рис. 4. Как видно из рисунка, для $r \geq 1$, коэффициент $k(T_{C 0,01})$ также близок к 1 (максимальная погрешность 3%). То есть при $r \geq 1$ для практических расчетов может быть принято, что интеграл действия, вычисленный за время спада значений импульса тока до уровня 0,01 от максимального значения, равен полному интегралу действия $J(T_{C 0,01}) = J(\infty)$.

Рассмотрим возможность формирования А–составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к прямому поражению молнией (импульс вида 1). Данный импульс характеризуется следующими нормируемыми параметрами [2]: $T_{H (0,1;0,9)} = 50 \pm 5$ мкс, $T_{C 0,01} = 500 \pm 50$ мкс., $i_{\max} = 200 \pm 20$ кА, $J(T_{C 0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$ А²·с. Можно показать, что для $T_{C 0,01} / T_{H (0,1;0,9)} = 10$ безразмерные параметры принимают следующие значения $r = 1,775$; $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,6$; $I_{\max} = 0,398$. Подставим их в (3) и при $t_H = T_{H (0,1;0,9)}$ рассчитаем зависимость полного интеграла действия от максимального значения тока. График зависимости показан на рис. 5, кривая 1.

Аналогичная зависимость (рис. 5, кривая 2) рассчитана для А–составляющей тока молнии, используемой для испытаний на устойчивость технических средств к вторичным проявлениям тока молнии (импульс

вида 2). Нормируемые параметры данного импульса имеют вид [2]: $T_{H (0,1;0,9)} = 2,85 \pm 0,285$ мкс, $T_{C 0,01} = 500 \pm 50$ мкс., $i_{\max} = 200 \pm 20$ кА, $J(T_{C 0,01}) = 2 \cdot 10^6 \pm 4 \cdot 10^5$ А²·с. Безразмерные параметры для $T_{C 0,01} / T_{H (0,1;0,9)} = 175$ принимают следующие значения $r = 8,516$; $\tau_{H(0,1;0,9)} = 0,221$; $I_{\max} = 0,117$.

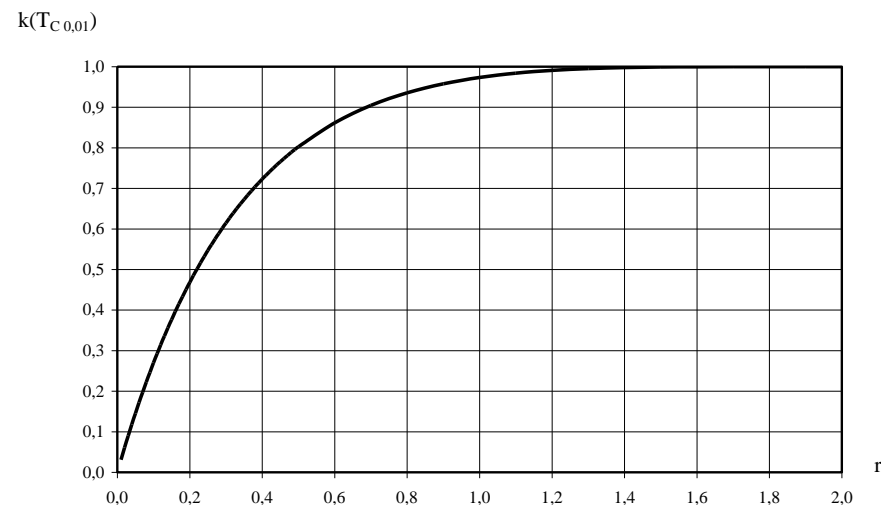


Рис. 4. Коэффициент уменьшения интеграла для колебательного режима разряда ЕНЭ

Как видно из рис. 5 для импульса вида 1 максимальному значению 200 кА соответствует $J = 6 \cdot 10^6$ А²·с (кривая 1), импульсу вида 2 – $J = 2,2 \cdot 10^6$ А²·с (кривая 2).

Таким образом, импульс тока вида 1 не может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, показанной на рис. 1. Импульс тока вида 2 может быть сформирован с заданным интегралом действия в пределах заданных допусков.

В качестве примера рассмотрим формирование импульса тока вида 2 в активной нагрузке $R_H = 0,1$ Ом с помощью генератора импульсов тока, имеющего следующие параметры: зарядное напряжение $U_C(0) = 100$ кВ; емкость $C = 220$ мкФ; активное сопротивление $R = 0,05$ Ом; индуктивность $L = 0,5$ мкГн.

Расчеты, проведенные с использованием материалов работ [4, 5], показывают, что заданный импульс может быть сформирован в традиционной схеме разряда ЕНЭ, если в цепь разряда последовательно с нагрузкой ввести формирующие элементы: активное сопротивление $R_\Phi = 0,35$ Ом и индуктив-

ность $L_{\Phi} = 0,25$ мкГн. Техническая реализация ЕНЭ и формирующих элементов с такими параметрами не представляет сложностей [7].

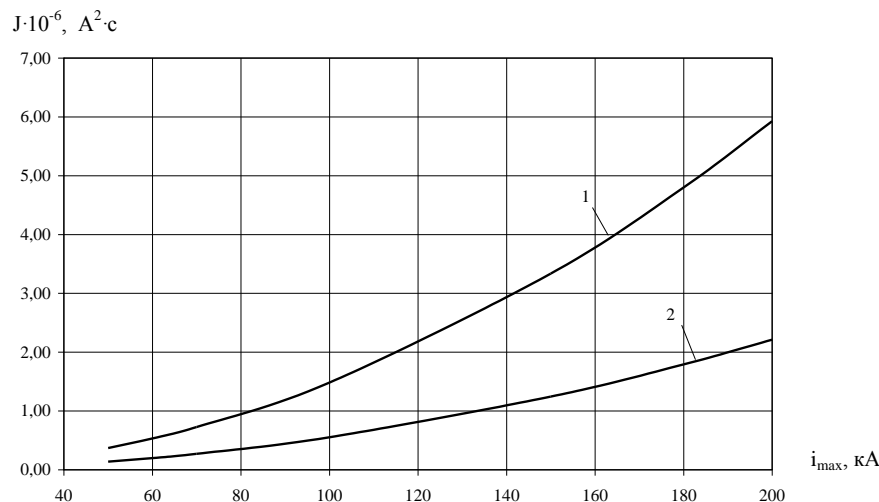


Рис. 5. Зависимость интеграла действия от максимального значения тока для А-составляющих тока молнии

Моделирование переходного процесса с помощью Micro-Cap [8] показало, что параметры формируемого импульса тока в нагрузке принимают следующие значения: $T_H(0,1;0,9) = 2,87$ мкс, $T_C(0,01) = 508$ мкс., $i_{\max} = 190,9$ кА, $J(T_C(0,01)) = 2,2 \cdot 10^6$ А²·с. Как показывает расчет отклонение временных параметров не превышают 2%, амплитудных – 5%, интеграла действия – 10% от заданных значений.

Выводы.

1. Получены соотношения, связывающие временные контролируемые параметры импульса тока, его наибольшее значение и интеграл действия.

2. Показано, что при разряде ЕНЭ для варианта соотношения параметров $R/\sqrt{L/C} \geq 1$ для практических расчетов интеграл действия, вычисленный за время соответствующее спаду значений до уровня 0,01 может быть принят равным полному интегралу действия (погрешность не превышает 3%).

3. Установлено, что импульс А-составляющей тока, используемый для имитации прямого поражения молнии не может быть сформирован в традиционной схеме с одним ЕНЭ в силу несоответствия нормированного интегра-

ла действия реальному, имеющему место при заданных амплитудно-временных параметрах.

4. Определены безразмерные параметры разрядного тока ЕНЭ соответствующего временным параметрам А-составляющих тока молнии.

Приведенные материалы могут быть использованы для дальнейшего исследования схем испытательных устройств для формирования токов молнии.

Список литературы: 1. Aircraft Lightning environment and related test waveforms standard. ED 84. Report of Eurocae WG31 and SAE committee AE4L. 2. MIL-STD-464A. Department of defense interface standard. Electromagnetic environmental effects requirements for systems – AMSC F7489, Area EMCS. – 2002. – 121 Р. 3. Квалификационные требования России. КТР-ВВФ /DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 23.0 Прямое воздействие молнии. С. 258 – 273. 4. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы // Электротехника та електроенергетика. - 2005. - №1. - С. 65 - 69. 5. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". - №17. – 2006. – С. 105 – 111. 6. Кузнецов И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с. 7. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Хромов В.В. Методы и средства испытаний электрооборудования на стойкость к электромагнитным импульсам естественного и искусственного происхождения // Международный симпозиум по электромагнитной совместимости. ЭМС-93.(21-26 июня 1993 г.). Сборник научных докладов. Ч.3 – Санкт-Петербург: ЭЛТУ. – 1993. – С. 630 – 633. 8. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.

Поступила в редакцию 18.04.2008.